

TIXOFORJAMENTO: UMA ROTA ALTERNATIVA AOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO PLÁSTICA

Luis Vanderlei Torres (IFSP) E-mail: torres@ifsp.edu.br

Resumo: A constante evolução das indústrias tem conduzido à redução do consumo de energia, à simplificação e diminuição das etapas de produção, como também à melhoria da qualidade. Neste contexto, o processamento de ligas metálicas no estado semissólido ganha visibilidade e mercado por apresentar inúmeras vantagens com relação aos processos convencionais de fabricação, tais como, aumento da vida útil de matrizes, obtenção de peças com excelente acabamento superficial e qualidade dimensional e produção de componentes próximos à geometria final; neste contexto, o processo de tixoforjamento está ganhando espaço em termos de aplicação industrial, principalmente no setor automotivo, com a produção de peças de sistemas de freios, braços mecânicos, polias de carro, compartimento de *air bag*, entre outros. Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura sobre o processamento de ligas metálicas no estado semissólido, em especial, ao processo de tixoforjamento por apresentar uma rota alternativa aos processos de conformação plástica.

Palavras-chave: metal semissólido, tixoconformação, tixoforjamento, conformação plástica.

THIXOFORGING: AN ALTERNATIVE ROUTE TO PLASTIC FORMING PROCESSES

Abstract: The constant evolution of industries has led to the reduction of energy consumption, the simplification and reduction of production stages, as well as the improvement of quality. In this context, the processing of metallic alloys in the semi-solid state gains visibility and market because it presents numerous advantages in relation to conventional manufacturing processes, such as increasing the useful life of dies, obtaining parts with excellent surface finish and dimensional quality and production of components close to the final geometry; in this context, the thixoforging process is gaining ground in terms of industrial application, mainly in the automotive sector, with the production of parts for brake systems, mechanical arms, car pulleys, air bag compartments, among others. Therefore, this work aims to present a literature review on the processing of metallic alloys in the semi-solid state, in particular, the thixoforging process, as it presents an alternative route to plastic forming processes.

Keywords: semi-solid metal, thixoforging, thixoforging, plastic forming.

1. Introdução

O processamento de ligas metálicas no estado semissólido, ou seja, a obtenção de componentes a partir da conformação de ligas metálicas no estado semissólido divide-se nos processos de reofundição e tixoconformação; sendo que no processo de reofundição o controle da temperatura é realizado na transição do estado líquido para o estado sólido e no processo tixoconformação o controle é realizado na transição do estado sólido para o estado líquido. O processo de tixoconformação subdivide-se em: processo de tixofundição (alta fração líquida entre 50% a 90%), processo de tixoforjamento (frações líquidas entre 30% a 50%) e processo de tixoextrusão (baixa fração líquida entre 10 a 50%) (FLEMINGS, 1991; ATKINSON, 2005; TORRES, 2019; TORRES, 2021).

As vantagens são inúmeras quando comparadas com os processos convencionais de fabricação, a saber: alta produtividade, aumento da vida útil das matrizes, maior rendimento energético devido a menores temperaturas de trabalho, fabricação de peças próximas à forma final, fácil automação do processo, boas propriedades mecânicas, etc., por essas razões o

processamento semissólido está bem consolidado na indústria automobilística (CHIARMETTA, 1996; CHIARMETTA, 2000; FAN, 2002; ATKINSON, 2005).

A matéria-prima mais empregada no processamento semissólido é o alumínio devido às diversas características, tais como, excelente fundibilidade, baixa densidade (aproximadamente um terço da densidade do aço) o que somado a sua elevada resistência mecânica torna-as bastante útil para a indústria (ABAL, 2023). As ligas de alumínio que contem silício apresentam destaque ocupando cerca de 95% do mercado, enquanto que todas as outras somadas representam somente 5% (CHIARMETTA, 2000). Além das vantagens já citadas, peças tixoconformadas em ligas de alumínio apresentam excelente resistência à fadiga (BERGSMA *et al.*, 2001; BROCHU *et al.*, 2012), além de serem adequadas para aplicações críticas onde exige-se máxima segurança. Mas o principal motivo pelo qual o alumínio substitui o aço ou o ferro fundido a cada dia nos automóveis é a necessidade de redução de peso; veículos leves impactam diretamente na redução do consumo de combustível com menores níveis de emissão de gases. Possibilitando atender às normas reguladoras em âmbito nacional e internacional que limitam a emissão de poluentes tais como monóxido de carbono, hidrocarbonetos totais, óxidos de hidrogênio, óxidos de nitrogênio, metano, hidrocarbonetos não metanos (CONAMA, 2002; REIS, 2013).

Como consequência, tem-se o surgimento de inúmeros institutos de pesquisa e grupos de trabalho para tratarem deste assunto; alguns ligados a universidades, outros a empresas e muitos em parcerias entre ambos. Várias empresas de médio e grande porte foram criadas em vários países no mundo, principalmente nos Estados Unidos, Europa e Japão para produzirem peças das mais variadas aplicações (TORRES, 2013). Portanto, este trabalho tem como objetivo aprofundar o conhecimento sobre a tecnologia semissólida em especial ao processo de tixoforjamento.

2. Fundamentação teórica

A metodologia adotada neste trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica através de artigos científicos e teses/dissertações acerca do tema abordado de natureza exploratória e descritiva. Este trabalho justifica-se pela relevância do tema, uma vez que a tecnologia semissólida apresenta inúmeras vantagens, tornando uma rota alternativa aos processos de conformação plástica. Para tanto, este capítulo foi dividido em quatro partes: a primeira parte apresenta o surgimento da tecnologia semissólida, a segunda parte apresenta o processo de tixoforjamento, a terceira parte apresenta as variáveis do processo de tixoforjamento, e por fim na quarta são apresentados os fenômenos existentes no processo de tixoforjamento.

2.1. Surgimento da tecnologia semissólida

O primeiro pesquisador a observar o comportamento semissólido das ligas metálicas foi Spencer, em 1972 no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), quando desenvolvia sua tese de doutorado, relacionado com a formação e desenvolvimento de trincas por contração durante a solidificação da liga Sn-15wt%Pb sob ação de forças cisalhantes; o efeito das forças cisalhantes sobre a liga em solidificação faz sua natural formação dendrítica romper-se, com isso as partículas sólidas remanescentes deste processo de rompimento ficam suspensas no líquido em movimento. Mantendo a temperatura da liga num valor intermediário entre as temperaturas *solidus* e *liquidus*, estas partículas sólidas suspensas no líquido e que sobrevivem tendem a assumir uma geometria aproximadamente globular, por efeito da necessidade da redução da tensão superficial do glóbulo cristalino (SPENCER *et al.*, 1972); assim, a microestrutura ideal para o processamento semissólido será a que apresentar os

menores tamanhos de grãos, mais homogêneos e mais globulares (FELTRIN, 2004; TORRES 2019).

2.2. Processo de tixoforjamento

O processo de tixoforjamento ocupa o segundo lugar em termos de aplicação industrial de processos de fabricação envolvendo pastas metálicas semissólidas. Os produtos tixoforjados já conquistaram espaço no setor automotivo tais como produção de peças de sistemas de freios, braços mecânicos, polias de carro, compartimento de *air bag*, entre outros (ROVIRA, 1996). No entanto, a expansão da produção de peças nas indústrias está ainda limitada ao fornecimento de matéria-prima semissólida e na complexidade de produção de alguns componentes mecânicos. A Figura 1 apresenta uma comparação relacionando desempenho *versus* custo do processo de tixoforjamento com outros processos de fabricação. Pode-se verificar que o processo de tixoforjamento é promissor já que possui um custo relativo médio associado a um desempenho próximo ao dos produtos forjados que por sua vez, possuem custo elevado (FLEMINGS, 2000; REIS, 2013).

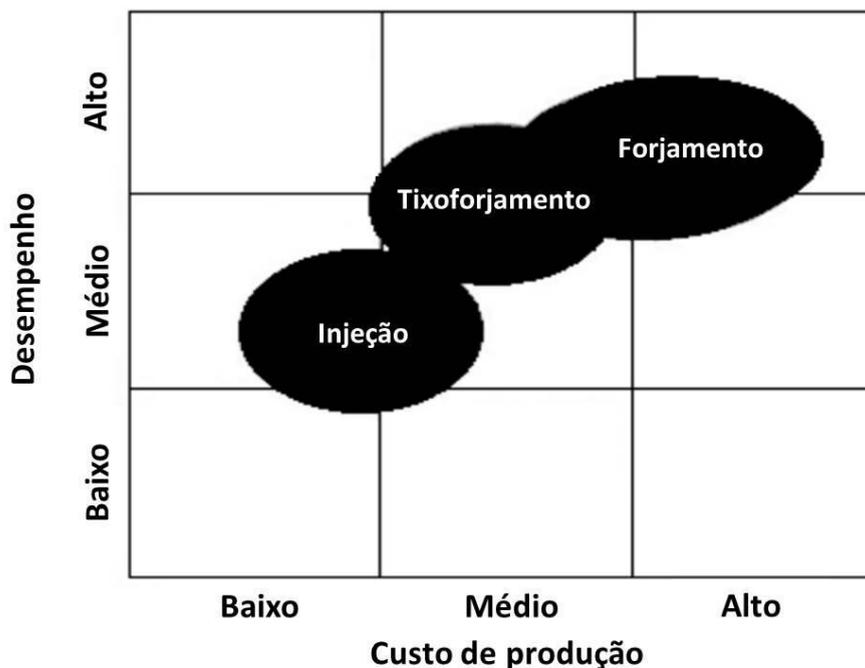


Figura 1 - Comparação entre os processos de tixoforjamento, injeção e forjamento em relação ao desempenho *versus* custo (Adaptado de FLEMINGS, 2000).

O processo de tixoforjamento apresenta várias vantagens em relação ao processo de forjamento, a saber: menor força de forjamento (ESPINOZA, 1998), menor número de operações para forjar uma determinada peça (KOOP *et al.* 1996), pode ser empregado para diversos metais ou ligas (KENNEY *et al.*, 1989), o metal no estado semissólido com estrutura globular escoo pela cavidade da matriz sob pressões baixas que possibilitam o total preenchimento de paredes finas ou formas complexas (SPENCER *et al.*, 1972), etc.

As operações que envolvem o processo de tixoforjamento são compostas basicamente de dois estágios: o aquecimento (ou reaquecimento) da matéria-prima e a conformação da peça; na Figura 2, pode ser visto todas as etapas do processo de tixoforjamento, desde a produção da

matéria-prima, passando pela etapa de reaquecimento do material até seu estado semissólido, chegando ao processo de tixoforjamento.

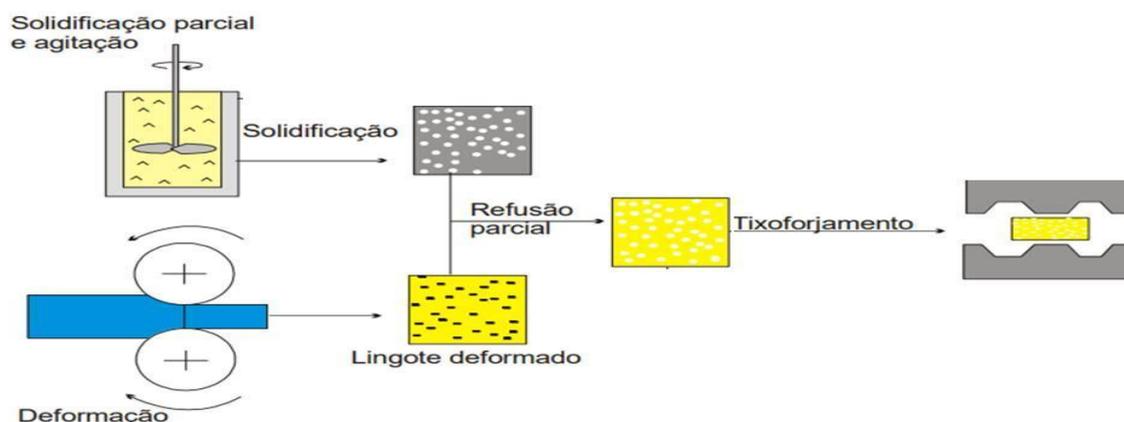


Figura 2 - Etapas do processo de tixoforjamento: produção da matéria-prima, reaquecimento do material até seu estado semissólido e processo de tixoforjamento (Adaptado de VIEIRA, 2004).

O processo de tixoforjamento pode ser realizado em matrizes abertas, isto é, forjamento livre ou em matrizes fechadas. Em matriz fechada na maioria dos casos são feitas peças com geometria mais simples, por exemplo, na forma de disco e são classificadas segundo a teoria do forjamento como peças classe de forma 2 (LAPKOSWIKI, 1992; ROBERT *et al.*, 2000; STEINHOFF, 2000). Mas Kopp *et al.* (2000), produziu peças classe de forma 3, na forma alongada ou tipo alavanca, porém, o trabalho visou particularmente aprimorar o projeto da ferramenta, sem se preocupar em avaliar a estrutura e as propriedades do produto. Lourençato (2008), utilizando ligas Al-Si-Mg com o teor de silício variando de 1wt% a 7wt% em peso, realizou o tixoforjamento em uma prensa do tipo excêntrica, com uma matriz do tipo aberta, onde a força máxima aplicada no processo foi de aproximadamente 5 kN. Utilizando uma fração sólida de apenas 45% houve uma maior facilidade de preenchimento do que para as ligas com fração sólida de 60%. Este fato se justifica tanto pela menor fração de sólido presente, como também pela viscosidade aparente menor da pasta semissólida (REIS, 2013).

Brabazon *et al.* (2002), realizaram um estudo extensivo sobre as propriedades mecânicas da liga de alumínio A356 agitada mecanicamente durante a solidificação e compararam com as propriedades da liga fundida convencionalmente. As variáveis do processo analisadas foram taxa de cisalhamento, tempo de cisalhamento e fração sólida; de maneira geral, a liga A356 agitada, isto é, reofundida, apresentou melhores resultados nas propriedades mecânicas e menor porosidade, em comparação com a liga solidificada convencionalmente. Kang *et al.* (2005) relatam excelentes resultados obtidos para o tixoforjamento de ligas de alumínio AA357, A319 e A390, e apontam para a substancial melhora das propriedades mecânicas após um tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial (T6).

2.3. Variáveis do processo de tixoforjamento

Para a realização de uma operação de tixoforjamento com êxito, obtendo produtos com boa qualidade superficial e exatidão em suas dimensões, é preciso compreender a influência das seguintes variáveis (TORRES, 2013):

- Composição química: a composição química da liga é de fundamental importância, pois ela define o intervalo da temperatura de trabalho, ou seja, ela delimita a região semissólida entre a linha *solidus* e *liquidus*;
- Estrutura da matéria-prima: deve estar adequada ao tipo de ensaio, ou seja, a estrutura deve ser globular (semissólida) com parâmetros conhecidos (tamanho de grão, tamanho de glóbulo, fração sólida, etc);
- Taxa de deformação: o controle da tensão aplicada e do tempo de aplicação da mesma é essencial em processos de tixoforjamento, pois influenciam diretamente na viscosidade da pasta e conseqüentemente no preenchimento correto da matriz e na qualidade superficial do produto;
- Temperatura de trabalho e tempo de permanência do material no estado semissólido: a temperatura de trabalho no processo de tixoforjamento é a temperatura de reaquecimento do material ao estágio semissólido, definindo assim, a relação fração sólida/fração líquida da pasta e conseqüentemente as forças necessárias para o processo. Outro parâmetro importante é o tempo de permanência do material no estado semissólido, o ideal é trabalhar com tempos pequenos para evitar o crescimento excessivo do grão;
- Temperatura da matriz de tixoforjamento: o principal cuidado com a matriz de tixoforjamento é manter sua temperatura, num valor tal que, o material semissólido não sofra um resfriamento excessivo, o que provocaria uma queda da fração líquida e conseqüentemente um aumento da tensão para a conformação (ROVIRA, 1996);
- Material da matriz de tixoforjamento: a matriz deve ser fabricada com materiais que suportem elevadas temperaturas, relativa à zona de trabalho da liga tixoforjada. As ligas de alumínio são tixoforjadas a temperaturas de até 650°C, sendo então adequado o emprego de aços da série H, por exemplo, os aços AISI H-12 e H-13 (ROVIRA, 2001).

Das variáveis discriminadas acima podemos dizer que a temperatura é uma das mais importantes, pois, afeta diretamente a proporção da fração líquida no processamento e repercute diretamente em todas as outras variáveis do processo (FLEMINGS, 1991). Porém, existem ainda outros fatores operacionais que devem ser levados em conta entre os quais podemos citar: a posição do material na câmara de aquecimento o qual poderá ser horizontal ou vertical; a razão altura/diâmetro da peça a ser tixoforjada; e a geometria e as dimensões do componente a ser tixoforjado (REIS, 2013).

2.4. Fenômenos existentes no processo de tixoforjamento

A deformação de materiais no estado semissólido ocorre por intermédio de algumas etapas: escorregamento da fase sólida em suspensão no líquido, expulsão do líquido para frente do escoamento, deformação dos grãos e conseqüentemente compactação da fase sólida (ROVIRA, 2001). Portanto, a partir destes mecanismos pode-se propor um modelo esquemático do preenchimento da matriz conforme visto na Figura 3. Estas observações permitem dividir em três etapas o processo de tixoforjamento: recalque, cisalhamento e compactação da fase sólida (TORRES, 2019).

- Recalque: após o início do processo, observa-se na Figura 3(b) que as tensões de cisalhamento geradas pela força aplicada (fase inicial da deformação) produzem recalque na base do corpo de prova com o deslocamento dos glóbulos primários, a

presença de líquido contornando os glóbulos primários/grãos reduz a resistência da deformação sendo que esta resistência diminui ainda com a temperatura semissólida, dada a maior quantidade de líquido presente. Nesta fase já há provavelmente a separação sólido/líquido com o líquido sendo rejeitado para frente do escoamento.

- Cisalhamento: na Figura 3(c) começa a ocorrer o preenchimento da matriz devido ao escoamento do material. O movimento relativo dos glóbulos primários/grãos sob o efeito das tensões de cisalhamento geradas pela força aplicada no material acarreta em seu rompimento. À medida que ocorre a conformação da peça, um maior número de contornos de grãos entram em contato, como resultado da rejeição de líquido para frente do escoamento, o que, unido ao atrito gerado pelo escoamento do material em contato com as paredes do molde, há o aumento da resistência na conformação. Neste momento, o material tentará escoar pelo caminho mais livre.
- Compactação: na Figura 3(d) observamos o último estágio do processo de tixoforjamento, onde ocorre a compactação mais intensa da estrutura, ou seja, o líquido guiado por gradientes de pressão é rejeitado para as extremidades da peça gerando assim uma região com muito líquido e na área central da peça praticamente não havendo presença de líquido. E como a área central da peça sofre uma alta deformação até a fase final de compactação, tem-se como resultado grãos totalmente deformados (TORRES, 2019).

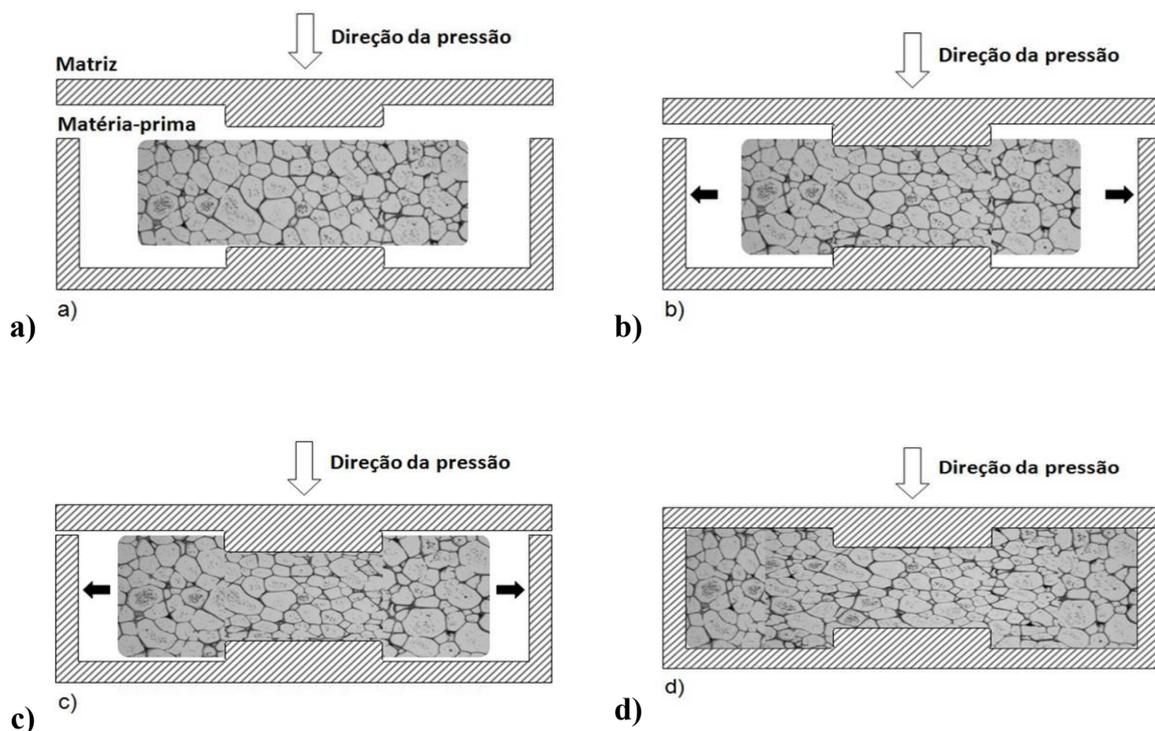


Figura 3 - Modelo esquemático do preenchimento da matriz no processo de tixoforjamento: (a) início, (b) recalque, (c) cisalhamento e (d) compactação (TORRES, 2019).

3. Conclusões

Este trabalho apresenta algumas considerações sobre o processamento de ligas metálicas no estado semissólido, em especial, ao processo de tixoforjamento:

- O processamento de ligas metálicas no estado semissólido tem ganhado visibilidade e mercado por apresentar características importantes dentro do processo produtivo, a saber: maior eficiência energética, alta produtividade, melhoria da qualidade dos produtos, maior vida útil dos moldes, microestruturas finas e homogêneas com propriedades melhoradas, geometrias mais complexas e produção de peças próximas à geometria final;
- O processo de tixoforjamento apresenta várias vantagens em relação ao processo de forjamento, a saber: menor força de forjamento, menor número de operações para forjar uma determinada peça, pode ser empregado para diversos metais ou ligas, o metal no estado semissólido com estrutura globular escoada pela cavidade da matriz sob pressões baixas que possibilitam o total preenchimento de paredes finas ou formas complexas, etc.;
- As operações que envolvem o processo de tixoforjamento são compostas basicamente de dois estágios: o aquecimento (ou reaquecimento) da matéria-prima e a conformação da peça, tornando o mesmo, uma rota alternativa aos processos de conformação plástica devido à diminuição das etapas de produção como também com relação às boas propriedades mecânicas adquiridas pelos produtos fabricados.

Agradecimentos

O autor agradece ao IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus Bragança Paulista.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). Disponível em <www.abal.org.br>. Acesso em: 02 maio 2023.

ATKINSON, H.V. *Modelling the semisolid processing of metallic alloys*, Progress in Materials Science. Vol. 50, p. 341-412, 2005.

BERGSMA, S.C.; LI, S.; KASSNER, M.E. *Semi-solid thermal transformations in Al-Si alloys: II. the optimized tensile and fatigue properties of semi-solid 357 and modified 319 aluminum alloys*. Materials Science and Engineering. Vol. 297, p. 69-77, 2001.

BRABAZON, D.; BROWNE, D.J.; CARR, A.J. *Mechanical stir casting of aluminum alloys from the mushy state: process, microstructure and mechanical properties*. Materials Science and Engineering A. Vol. 326, p. 370-381, 2002.

BROCHU, M.; VERREMAN, Y.; AJERSCH, F.; BOUCHARD, D. *Propagation of short fatigue cracks in permanent and semi-solid mold 357 aluminum alloy*. International Journal of Fatigue. Vol. 36, p. 120-129, 2012.

CHIARMETTA, G. *Thixoforming of automobile components*, In: Proceedings of the 4th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Sheffield, England, p. 204-207, 1996.

CHIARMETTA, G. *Why thixo?* In: Proceedings of the 6th International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Turin, Italy, p. 15-21, 2000.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE DO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 315 de 29 de Outubro de 2002.

ESPINOZA, M.M.; SCHAEFFER, L.; MONTEIRO, W.A. *Aspectos do forjamento semissólido com matriz fechada*. 53º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG, p. 567-573, 1998.

FAN, Z. *Semisolid metal processing*. International Materials Reviews. Vol. 47, n. 2, p. 49-85, 2002.

- FELTRIN, J. V.** *Obtenção e caracterização de estruturas reofundidas e tixofundidas da liga de alumínio AA7075*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2004.
- FLEMINGS, M.C.** *Behavior of metal alloys in the semisolid state*. Metallurgical Transactions. Vol. 22A, p. 957-981, 1991.
- FLEMINGS, M.C.** *Semi-solid forming: the process and then path forward*. Metallurgical Science and Technology. Vol.18, n. 2, p. 3-4, 2000.
- KANG, C.G.; YOUN, S.W.; SEO, P.K.** *Data base construction on mechanical properties of thixoforged aluminum parts and their microstructure evolution*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 159, p. 330-337, 2005.
- KENNEY, M.P.; COURTOIS, J.A.; EVANS, R.D.; FARRIOR, G.M.; KYONKA, C.P.; KOCH, A.A.** *Semi-solid metal casting an forging*. Metal Handbook. Vol. 15, p. 327-330, 1989.
- KOOP, R.; BREMER, T.; MERTENS, P.** *Thixoschmieden - verarbeitung von metallischen werkstoffen im schmelzflüssigen oder teilerstarren zustand zu formstücken*. ASK. Vol. 11, p. 273-280, 1996.
- KOOP, R.; NEUDENBERGER, D.; WINNING, G.** *Optimization of forming variants and transverse extrusion with alloys in the semi-solid state*. In: Proceedings of the 6th International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Turin, Italy, p. 295-300, 2000.
- LAPKOWSKI, W. & SINCZAK, J.** *Formability of metal alloys in the part-liquid state*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 32, p. 271-277, 1992.
- LOURENÇATO, L.A.** *Tixoforabilidade e tixoforjamento de Ligas Al-Xwt%Si0,5wt%Mg em prensa excêntrica com matriz aberta*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2008.
- REIS, A.A.** *Parâmetros de processamento para tixoconformação de uma liga Al-3,8%Si reciclada a partir de latas de alumínio*, Dissertação de Mestrado, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, 2013.
- ROBERT, M.H. & ROVIRA, M.M.M.** *Uma contribuição ao estudo da conformação de ligas metálicas no estado semi-sólido*. 9º Congresso Chileno de Ingeniería Mecánica y IV Congreso Nacional de Energía. Valpariso, Chile, p. 86-93, 2000.
- ROVIRA, M.M.M.** *Viabilização do tixoforjamento da liga Al-4,5%Cu super-refinada*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1996.
- ROVIRA, M.M.M.** *Forjamento da liga AA2011 no estado semi-sólido: estudo do processo e do produto*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2001.
- SPENCER, D.B.; MEHRABIAN, R.; FLEMINGS, M.C.** *Rheological behavior of Sn-15%Pb in the crystallization range*. Metallurgical Transaction. Vol. 3, p. 1925-1932, 1972.
- STEINHOFF, K.; GULLO, G.C.; KOPP, R.; UGGOWITZER, P.J.** *A new integrated production concept for semi-solid high quality Al products*. In: Proceedings of the 6 th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Turin, Italy, p. 121-127, 2000.
- TORRES, L.V.** *Tixoconformação de novas ligas Al-Si-Cu*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2013.
- TORRES, L.V.** *Uma revisão sobre a tecnologia de processamento de ligas metálicas no estado semissólido*. Impactos das tecnologias na engenharia de materiais e metalúrgica, 1 ed. Ponta Grossa, Brasil: Atena Editora, 2019.
- TORRES, L.V. & ZOQUI, E.J.** *Microstructural characterization of the AA7004 and AA7075 thixoforging alloys in an eccentric press*. Matéria, e-12452, 2019.
- TORRES, L.V.** *Processamento de ligas metálicas no estado semissólido: fenômenos, características e vantagens de sua utilização*. Revista de Engenharia e Tecnologia. Vol. 13, n. 2, 2021.
- VIEIRA, E.A.** *Interações entre comportamento reológico e evolução microestrutural da liga Al-7Si0,3Mg no estado semi-sólido*, Tese de Doutorado, Departamento de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2004.
- ZOQUI, E.J.; PAES, M.; ES-SADIQI, E.E.** *Macro and microstructure analysis of the SSM A356 produced by electromagnetic stirring*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 120, p. 365-373, 2002.